

Les alliages à base de fer

Chapitre 10

Plan

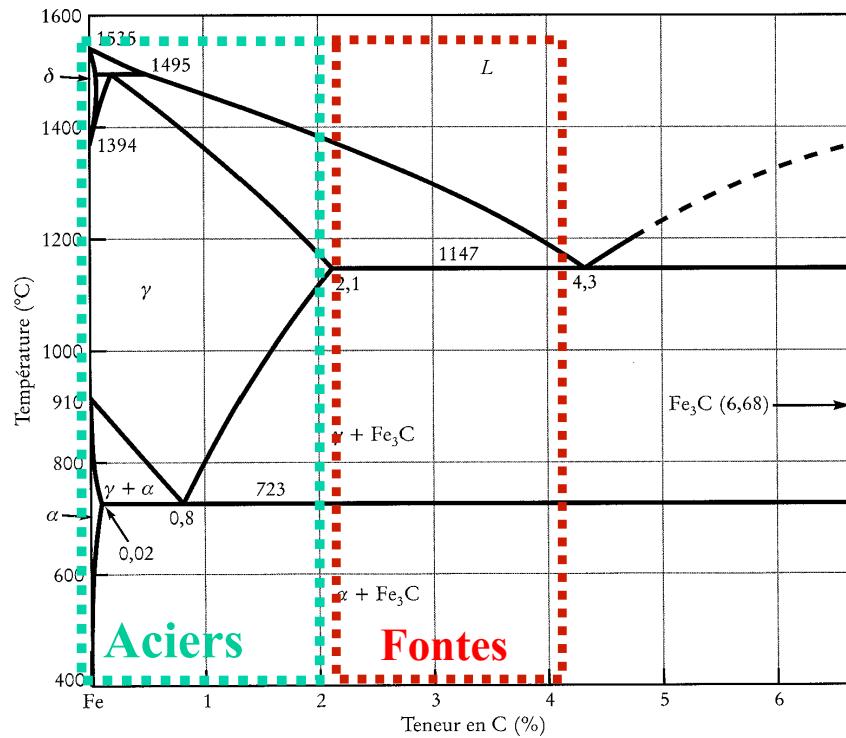
- **Introduction**
- Les aciers
 - Introduction
 - Classification
 - À faible teneur en carbone
 - À moyenne teneur en carbone
 - À forte teneur en carbone
 - Inoxydables
- Les fontes
 - Fontes grises
 - Fontes blanches

Objectifs

- Classer les différents types d'aciers et comprendre leurs propriétés et comment on peut les modifier;
- Premier contact avec les fontes;
- Apprendre à faire un choix plus éclairé du matériau.

Aciers et fontes

- 90 % en masse de la production mondiale des alliages métalliques.
- Atouts :
 - Les composés contenant du fer existent en grande quantité sur la croûte terrestre.
 - La fabrication des alliages ferreux est peu coûteuse.
 - Grande souplesse de mise en forme.
- Inconvénients :
 - Très susceptible à la **corrosion**.
 - **Lourds** : Aciers : 7.86 g/cm^3 ; Inox : $7.6 \text{ à } 8 \text{ g/cm}^3$
» Fontes : $7.1 \text{ à } 7.3 \text{ g/cm}^3$



Plan

- Introduction
- Les aciers
 - Introduction
 - Classification
 - À faible teneur en carbone
 - À moyenne teneur en carbone
 - À forte teneur en carbone
 - Inoxydables
- Les fontes
 - Fontes grises
 - Fontes blanches

Introduction

- Matériaux les plus utilisés :
 - Fins structurelles, charges, bâtiments, ponts, outils, automobile, réacteurs chimiques.
- Lesquels utiliser et quand?
- Quelles sont les grandes familles?
- Comment contrôler leur propriétés?
 - % C
 - Éléments d'alliage
 - Microstructure (modifiée par traitement thermique ou thermomécanique).

Teneur en carbone

- % C (aciers d'usage générale) $< 0.2 \%$
- Avec une augmentation de la teneur en C,
 - Résistance mécanique augmente,
 - TTDF augmente,
 - Soudabilité diminue
 - Trempabilité augmente.

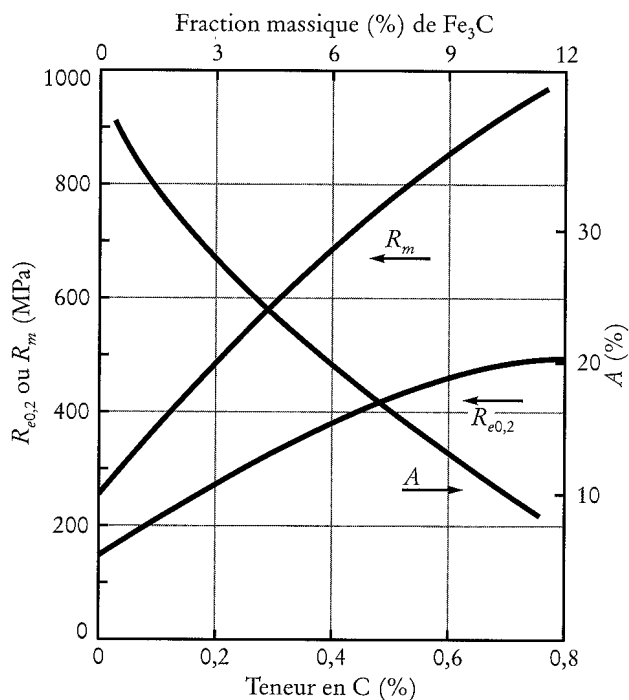


Figure 6.17 Variation des propriétés mécaniques des aciers au carbone à l'état normalisé en fonction de leur teneur en carbone.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

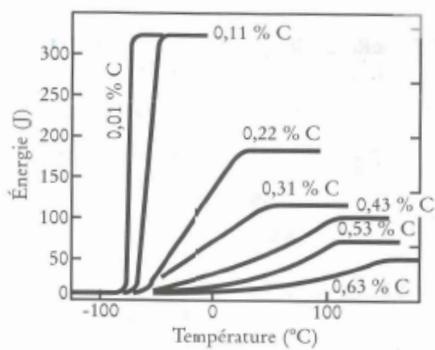


Figure 7.16 Variation, en fonction de la température, de l'énergie requise pour rompre une éprouvette Charpy-V, pour une série d'aciers au carbone à l'état normalisé. (D'après J.A. Rinebolt et W.J. Harris Jr, Trans. ASM, 43, 1951, p. 1175 ; utilisation autorisée.)

Aciers à propriétés améliorées

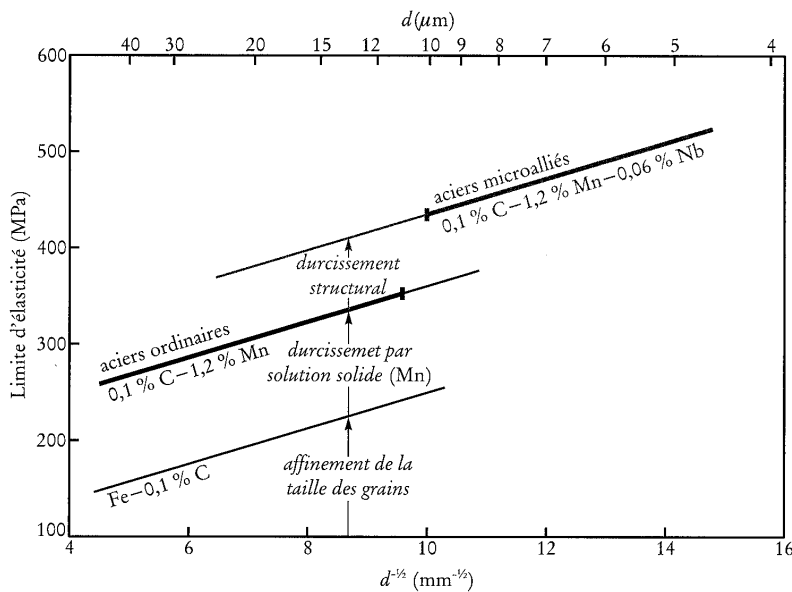


Figure 10.1 Relation de Hall-Petch pour les aciers ordinaires et les aciers microalliés HSLA, et influences combinées de l'affinement de la taille des grains, du durcissement par solution solide et du durcissement structural sur la limite d'élasticité.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-11

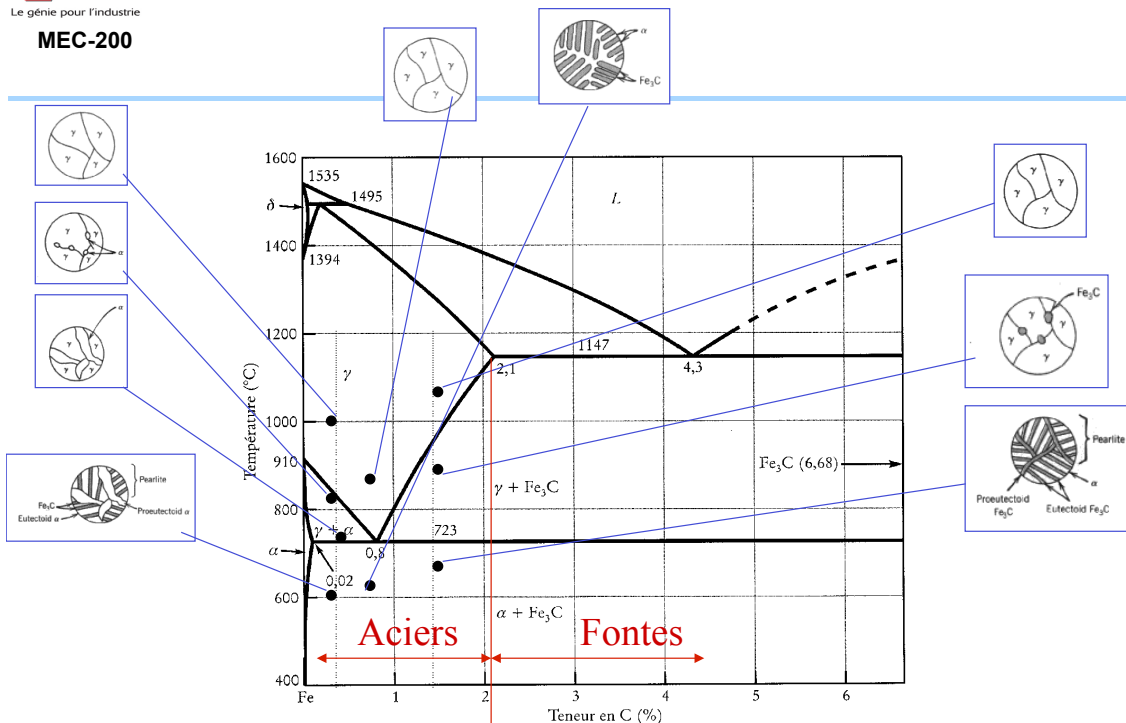


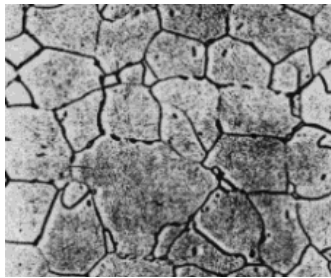
Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre entre le fer et la cémentite Fe_3C .

Adapté de: Des matériaux et de Rainville

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-12

La ferrite



Ferrite granulaire

Solution solide de carbone dans le fer.(cc)
0.008 % de carbone à température ambiante
et environ 0.025 % de carbone à 720°C.

Ductile et malléable :

80 à 100 HV, $R_m \approx 300 \text{ Mpa}$ et un $A \% \approx 35 \%$.

La ferrite est magnétique jusqu'à 770 °C (point de curie).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

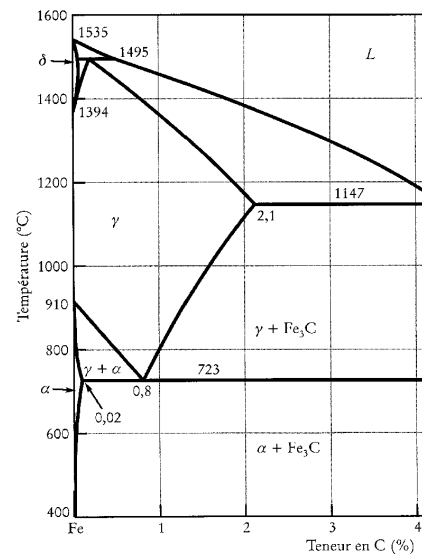
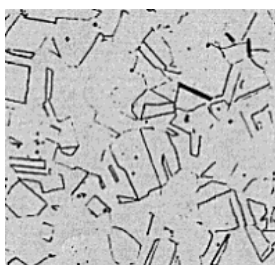


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre ent

10-13

Austénite



Microstructure de l'austénite

Solution solide de carbone
dans le fer gamma (γ).

La quantité de carbone atteint 1.7 % à 1145°C, ce constituant n'existe pas à la température ordinaire, il est stable qu'à haute température.

Elle ne peut exister à la température ambiante que par un maintien hors équilibre à la faveur d'éléments d'alliages, dit gammagènes (ex. Ni et Mn). C'est le cas des aciers austénitiques.

Très ductile entre 22 et 31 HR_c

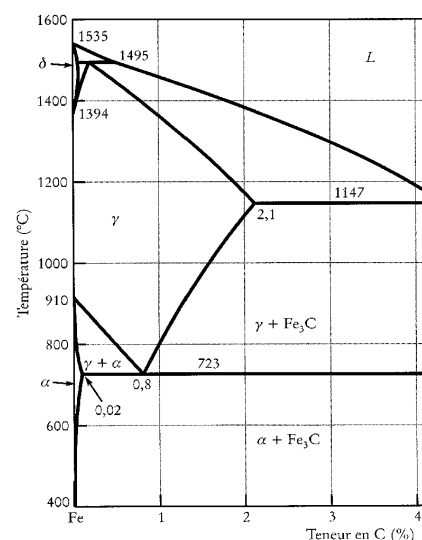


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre ent

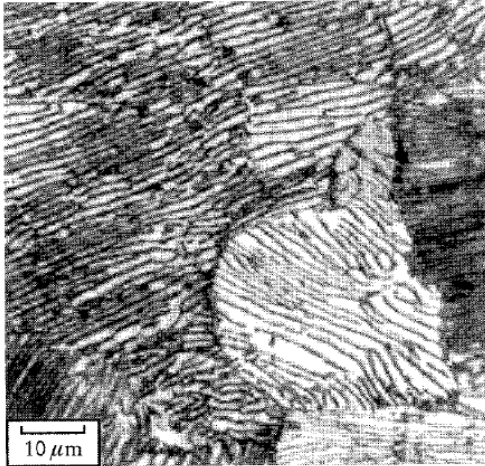
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-14

Microstructures d'alliages Fe-C

Perlite



0.8 % C ; 100% perlite;
lamelles alternées de ferrite
et de cémentite

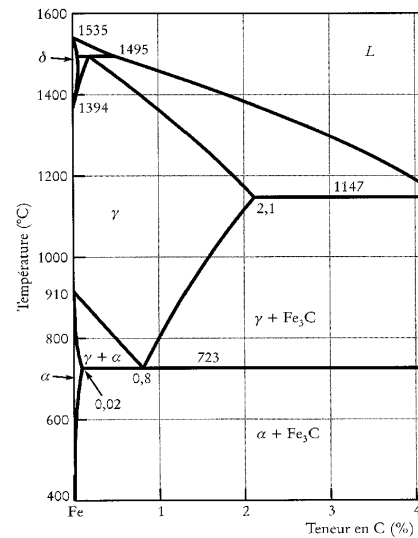


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre ent

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

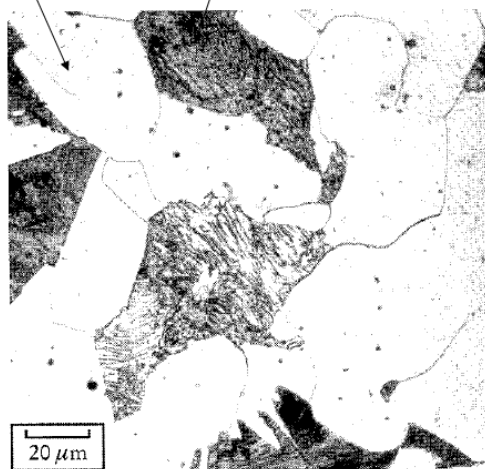
MEC-200 – Technologie des matériaux

10-15

Microstructures d'alliages Fe-C

Mélange hypo-eutectoïde

pro-eutectoïde Perlite ($\alpha + Fe_3C$)



0.2 % C ; 25 % perlite;
75% ferrite pro-eutectoïde

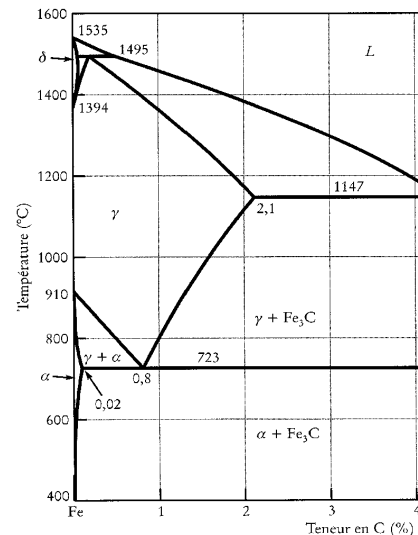


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre ent

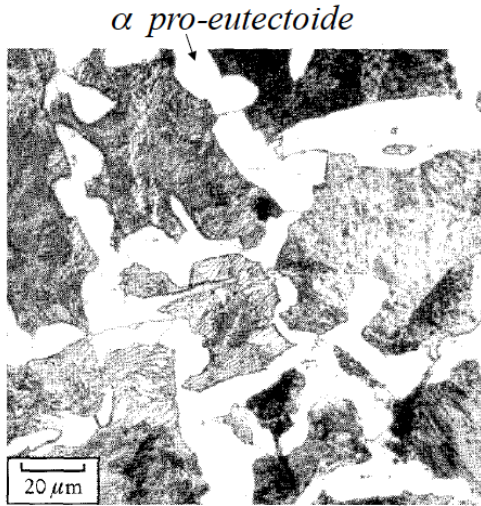
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-16

Microstructures d'alliages Fe-C

Mélange hypo-eutectoïde



0.6 % C ; 75 % perlite;
25 % de ferrite pro-eutectoïde

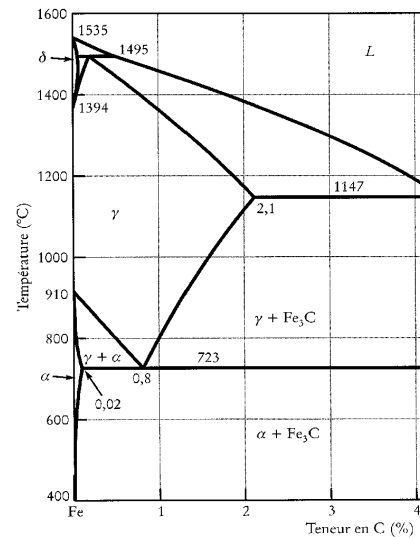


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre ent

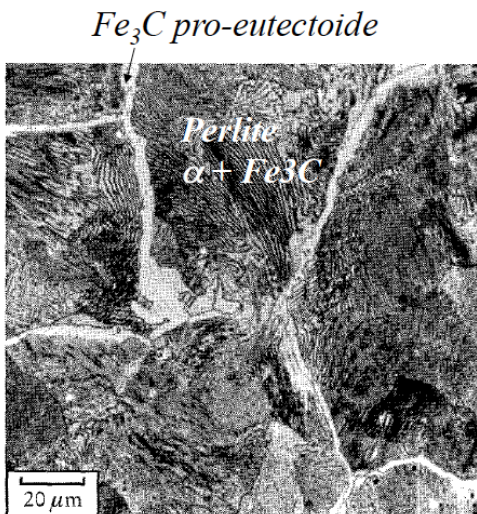
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-17

Microstructures d'alliages Fe-C

Mélange hyper-eutectoïde



1.0 % C ; 97 % perlite;
3 % de cémentite le long
des joints de grains γ

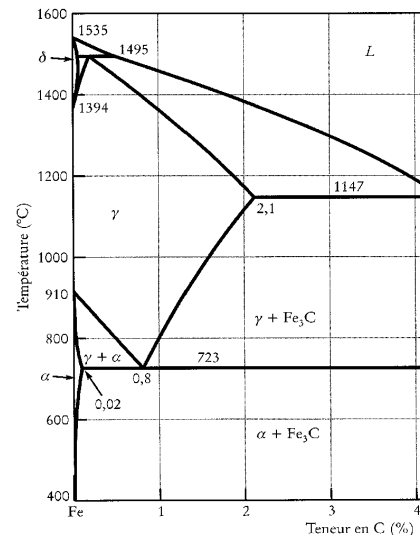


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre ent

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-18

Diagramme d'équilibre Fe-C

Acier = ferrite + cémentite

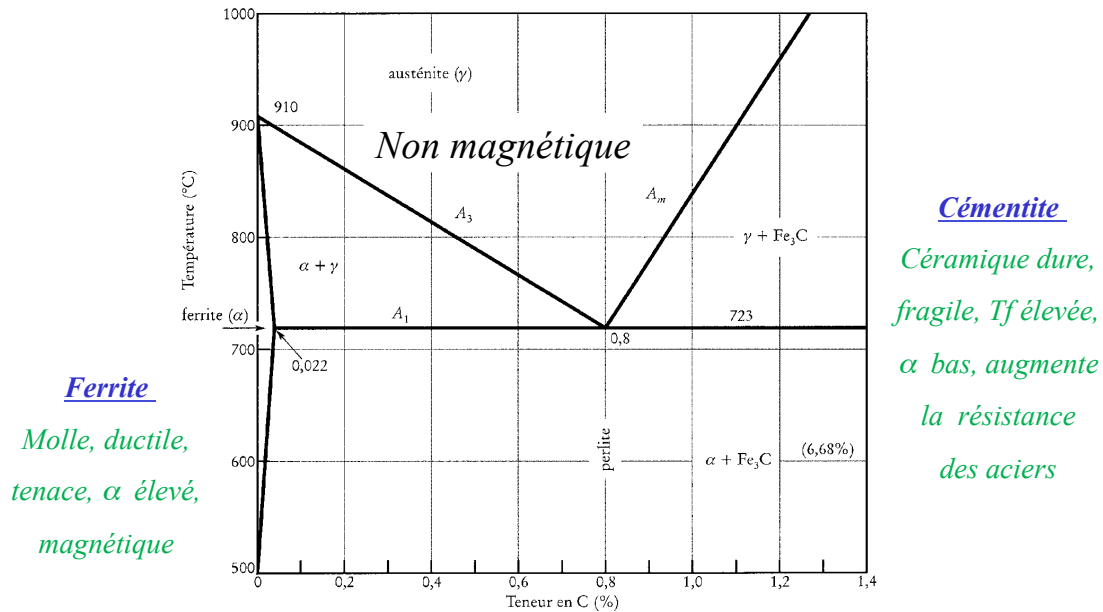


Figure 6.18 Partie du diagramme Fe-C représentant les transformations des aciers à l'état solide.

10-19

Acier : ferrite + perlite

- Ferrite : très ductile
 - Perlite : peu ductile
- } ACIER : moyennement ductile
-
- Ferrite : peu résistante
 - Perlite : très résistante
- } ACIER : moyennement résistant



Les propriétés d'un acier dépendent donc des phases en présence

Exercice

- Un acier non allié utilisé pour usiner des roues d'automobile en Al a bien marché, mais vous avez perdu les spécifications de cet acier et n'en connaissez pas la composition. La microstructure est une martensite et vous ne pouvez pas, à partir de la microstructure, savoir quelle est la composition de l'acier.
- Pensez à un traitement thermique que vous pourriez utiliser pour connaître la quantité de carbone.

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-21

Plan

- Introduction
- Les aciers
 - Introduction
 - **Classification**
 - À faible teneur en carbone
 - À moyenne teneur en carbone
 - À forte teneur en carbone
 - Inoxydables
- Les fontes
 - Fontes grises
 - Fontes blanches

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-22

Classification

- Suivant les propriétés
- Suivant la composition chimique
- Suivant leur fonction sidérurgique (produits longs et plats)

Classification

Par exemple, la norme ACNOR G40.21 définit la composition chimique et les propriétés mécaniques de la classe 350 WT des tôles fortes comme suit :

- Épaisseur maximale, t : 60 mm.
- Composition chimique (acier calmé) :

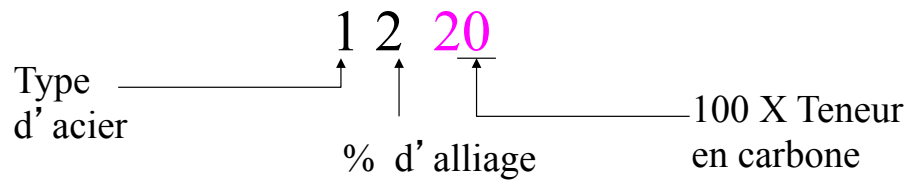
| C (%) | Mn (%) | Si (%) | P (%) | S (%) | Éléments d'affinage des grains (%) |
|-----------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------------------------------|
| 0,20 max. | 0,80 à 1,50 | 0,15 à 0,40 | 0,03 max. | 0,04 max. | 0,10 max. |

- Propriétés mécaniques :

| R_m (MPa) | R_e (MPa) | | A (% sur 50 mm) |
|-------------|----------------|-------------|-------------------|
| 480 à 650 | $t \leq 40$ mm | $t > 40$ mm | 22 |
| | 350 min. | 330 min. | |

L'acheteur peut également demander que l'énergie de rupture (KCV, résilience Charpy-V) soit de 27 J à 0, -20, -30 ou -45 °C.

Classification SAE des aciers



1. Le premier chiffre indique le type d'acier; il donne l'alliage prédominant dans l'acier.
2. Le deuxième chiffre indique la teneur en % de l'élément d'alliage principal autre que le carbone.

Les 2 (ou 3) derniers chiffres indiquent la teneur en carbone en centième de pourcentage.

51**100** Acier au chrome à 1 % de carbone

Classification SAE des aciers

| 1 ^{er} chiffre | 2 ^{ème} chiffre | Code |
|-------------------------------|---------------------------------|--------------|
| 1 Carbone | 0 Courant | 10 XX |
| | 1 Avec soufre | 11 XX |
| | 2 Avec phosphore | 12 XX |
| | 3 Avec manganèse | 13 XX |
| 2 Nickel | 0 Nickel = 0.50 % | 20 XX |
| | 1 Nickel = 1.5 % | 21 XX |
| | 3 Nickel = 3.50 % | 23 XX |
| | 5 Nickel = 5.00% | 25 XX |
| 3 Nickel-Chrome | 0 Ni = 0.70 %, Cr = 0.70 % | 30 XX |
| | 1 Ni = 1.25 %, Cr = 0.60 % | 31 XX |
| | 2 Ni = 1.25 %, Cr = 1.00 % | 32 XX |
| | 3 Ni = 3.50 %, Cr = 1.50 % | 33 XX |

Classification SAE des aciers

| 1 ^{er} chiffre | 2 ^{ème} chiffre | Code |
|----------------------------------|---|--------------|
| 4 Molybdène | 1 Mo = 0.25% Cr = 1 % | 41 XX |
| | 3 Mo = 0.25% Cr = 0.80 % Ni = 1.75 % | 43 XX |
| | 6 Mo = 0.25% Ni = 1.75 % | 46 XX |
| | 8 Mo = 0.25% Ni = 3.75 % | 48 XX |
| 5 Chrome | 0 Faible teneur (± 0.50%) | 50 XX |
| | 1 Teneur moyenne (± 1 %) | 51 XX |
| | 2 Haute teneur (± 1.50%) | 52 XX |
| 6 Chrome-vanadium | 1 Chrome = 1%, vanadium = 0.10-0.15% | 61 XX |
| 8 Nickel-chrome-Molybdène | 1 Ni = ± 0.30% Cr = ± 0.40% Mo = ± 0.10 % | 81 XX |
| | 6 Ni = ± 0.55% Cr = ± 0.50% Mo = ± 0.20 % | 86 XX |
| | 8 Ni = ± 0.55 % Cr = ± 0.50% Mo = ± 0.35 % | 88 XX |
| 9 Silicium-manganèse | 2 Manganèse = ± 0.85% Silicium = ± 0.35 % | 92 XX |

Produits longs

- Poutrelles et profilés :
 - H, I, T, U, cornières.
- Fers marchands :
 - Rond, hexagonal, carré, oval, rond à béton.
- Fil :

Fabrication de clous, pointes, vis, boulons, câbles métalliques, treillis, électrodes de soudage...
- Rails de chemin de fer (0.5-0.7 % C);
- Tubes non soudés.

Produits plats

- **Tôles fortes et plaques ($e > 5$ mm)**
 - Laminage à chaud;
 - Construction métallique, ponts, construction navale, plates-formes de forage, chaudières, appareils sous pression, réservoirs et citernes, tubes pour gazoducs et oléoducs...
- **Tôles minces**
 - Laminées à chaud ($e > 2$ mm);
 - Laminées à froid ($e < 3$ mm);
 - 80 % de la production des aciers d'usage général;
 - Automobile, électroménager et bâtiment;
 - Emboutissage, pliage, découpage;
 - Carbone < 0.08 %.

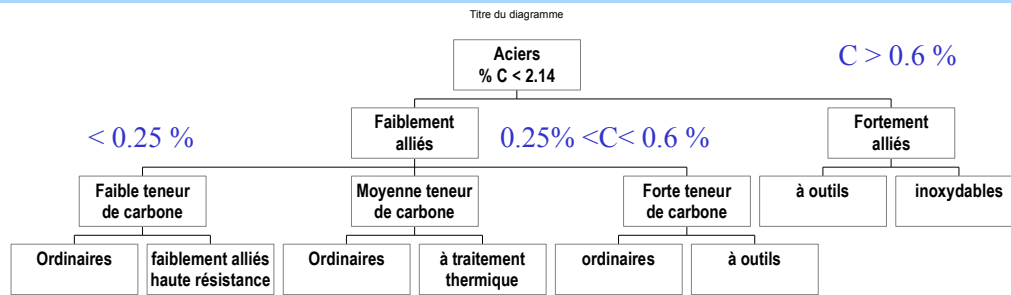
MEC-200 – Technologie des matériaux

10-29

Classification

- Suivant les propriétés
- **Suivant la composition chimique**
- Suivant leur fonction sidérurgique (produits longs et plats)

Classification des aciers

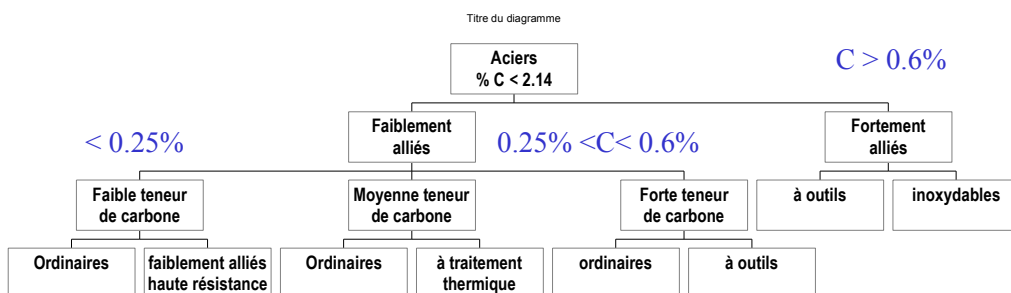


- Très faible teneur en C < 0.03 % mais contient Si, Mn, impuretés.
- Faible teneur en carbone 0.04 < C < 0.15 % carrosseries.
- Relativement faible teneur en carbone 0.15 < C < 0.3 % ponts, structures, pipes.
- Teneur en carbone moyenne 0.3 < C < 0.6, machinerie, équipements pour industrie minière.
- Forte teneur en C 0.6 < C < 2.14 % ressorts, roues...

10-31

MEC-200 – Technologie des matériaux

Classification des aciers



Cu,
Ni
V
Mo
% < 10% m

Il n'y a pas un acier meilleur qu'un autre,
ça dépend de l'application!

$$Ceq = \%C + \frac{1}{6} Mn + \frac{1}{5} (Cr + Mo + V) + \frac{1}{15} (Ni + Cu)$$

10-32

MEC-200 – Technologie des matériaux

Aciers d'usage général

- Utilisés tels quels, sans traitement ultérieur.
- 85 % de la production des aciers.
- Produits en très grandes quantités.
- Coûts relativement bas.

Éléments d'addition et impuretés

| <i>Si (%)</i> | <i>Mn (%)</i> | <i>S (%)</i> | <i>P (%)</i> |
|---------------|---------------|--------------|--------------|
| 0.6 | 1.2 | 0.06 | 0.06 |

- **Mn : déoxydant, désulfurant**
 - Durcissement par solution solide;
 - Augmente proportion de perlite;
 - MnS.
- **Si : déoxydant**
 - Durcissement par solution solide;
 - Diminution de la soudabilité.
- **S, P : impuretés**
 - Augmente la fragilité, diminue la soudabilité.

Propriétés mécaniques

- *Désignation en fonction de leurs propriétés mécaniques*
- *Propriétés mécaniques sont fonction :*
 - *Teneur en carbone,*
 - *Conditions d'élaboration des aciers et de fabrication des pièces.*
- *Coulée en lingots ou coulée continue*
 - *Aciers effervescent,*
 - *Aciers calmés.*

Aciers effervescent

- Contiennent un excès d'oxygène au moment de leur coulée.
- Libération d'un volume important de CO lors de la solidification dans la lingotière.
- Formation de soufflures qui compensent pour le retrait.
- Composition hétérogène (peau de Fe pur).
- Tôles pour emboutissage profond.
- Difficilement soudable.

Aciers calmés

- Éléments déoxydants (Si, Al, Mn).
- Éffervescence ne se produit pas.
- Peu de ségrégation du carbone.
- Aciers pour soudage, aciers à moyenne et haute teneur en C.

Propriétés mécaniques

- *Désignation en fonction de leurs propriétés mécaniques*
- *Propriétés mécaniques sont fonction*
 - *Teneur en carbone*
 - *Conditions d'élaboration des aciers et de fabrication des pièces*
 - *Coulée en lingots ou coulée continue*
 - *Aciers effervescent*
 - *Aciers calmes*
 - *Réduction de la section lors du laminage*
 - *Température de laminage*
 - *Vitesse de refroidissement*
 - *Section et épaisseur du produit fini*
 - *Traitements thermiques...*

Aciers à faible teneur de carbone

Faible teneur
de carbone

→ %m C < 0.25

Ordinaires

Ferrite + perlite

faiblement alliés

haute résistance

- **Exemples**

- 1010, 1020

- **Propriétés mécaniques**

- $R_m = 415$ à 550 MPa

- **Utilisation**

- Carrosseries d'auto, clous, fils
 - Poutres, ponts et immeubles

- **Caractéristiques**

- Insensibles aux TT
 - Sensibles à l'écrouissage
 - Mous et faibles
 - Ductilité et ténacité très élevées
 - S'usinent et se soudent bien

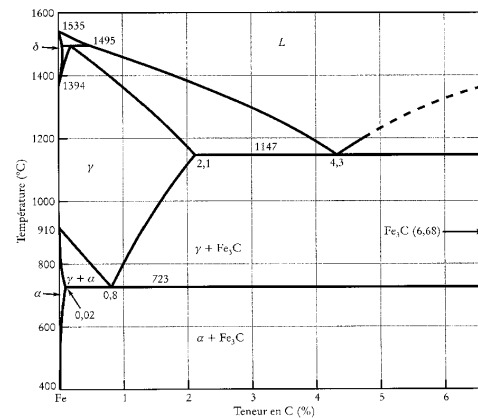


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre entre le fer et la cémentite Fe_3C .

MEC-200 – Technologie des matériaux

Aciers à faible teneur de carbone

Faible teneur
de carbone

→ %m C < 0.25

Ordinaires

Ferrite + perlite

faiblement alliés

haute résistance

Microalliés : Cu, V, Ni, Mo

- **Exemples**

- 1010, 1020

- **Propriétés mécaniques**

- $R_m = 415$ à 550 MPa

- **Utilisation**

- Carrosseries d'auto, clous, fils
 - Poutres, ponts et immeubles

- **Caractéristiques**

- Insensibles aux TT
 - Sensibles à l'écrouissage
 - Mous et faibles
 - Ductilité et ténacité très élevées
 - S'usinent et se soudent bien

- **Exemples**

- A440, A633, A656

- **Propriétés mécaniques**

- $R_m > 480$ MPa

- **Utilisation**

- Structures boulonnées ou rivetées (A440)
 - Châssis des camions (A656)
 - Conteneurs sous pression

- **Caractéristiques**

- Ductiles, formables et usinables
 - Résistent mieux à la corrosion que les ordinaires

MEC-200 – Technologie des matériaux

- **Aciers microalliés à haute limite d'élasticité :**
 - Faibles additions d'éléments d'alliages;
 - Traitements thermomécaniques contrôlés.
- **Carbures solubles à haute température seulement :**
 - Nb, V, Ti (< 0.1 %);
 - Empêcher la croissance des grains auténitiques;
 - Favoriser le durcissement structural.
- **Contrôler :**
 - Température laminage, et fin de laminage;
 - Vitesse de refroidissement.

$$\text{Hall-Petch: } Re = A + B d^{-1/2}$$

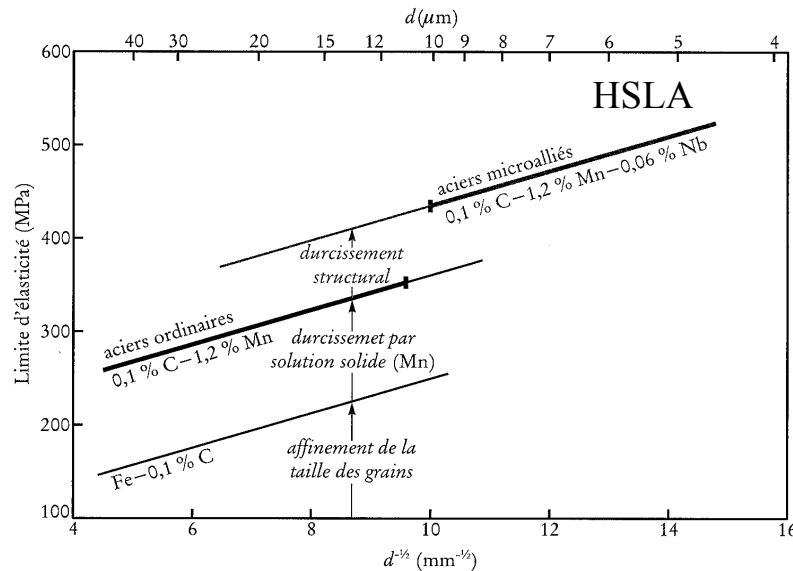


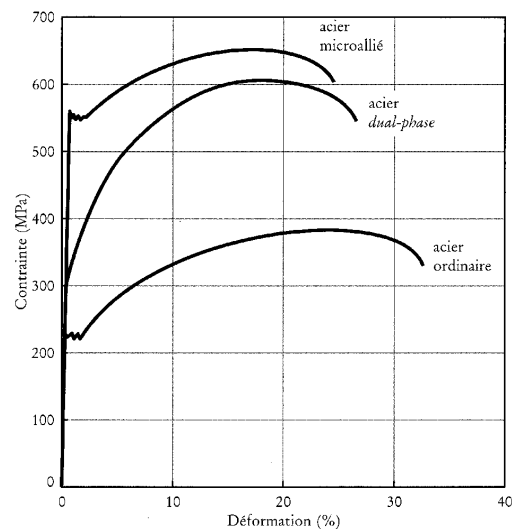
Figure 10.1 Relation de Hall-Petch pour les aciers ordinaires et les aciers microalliés HSLA, et influences combinées de l'affinement de la taille des grains, du durcissement par solution solide et du durcissement structural sur la limite d'élasticité.

Propriétés des aciers HSLA

- Limite d'élasticité 400-650 Mpa
 - Résistance de traction 600-850 Mpa
 - Allongement à la rupture 14-27 %
 - TTDF très basse
-
- Gazoducs, oléoducs, structures dans les régions froides
 - Réduction du poids des pièces (industrie automobile)

Aciers dual-phase

- *HSLA bonnes propriétés mécaniques, mais R_e trop grand pour une bonne formabilité à froid.*
- Développement de nouveaux alliages => faible R_e mais possibilité d'augmenter par écrouissage.



Aciers dual-phase

- HSLA bonnes propriétés mécaniques mais R_e trop grand pour une bonne formabilité à froid.
- Développement de nouveaux alliages => faible R_e mais possibilité d'augmenter par écrouissage.
- Carbone 0.08-0.15 %.
- Trempe à partir du domaine intercritique (A_1 - A_3).
- Microstructure (*permettant la déformation plastique*) :
 - Grains ferritiques sans cémentite;
 - Îlots de martensite (10-20 %).
- Trempe à la sortie du laminoir :
 - Trempabilité améliorée avec Cr (0.5%) et Mo (0.4 %)

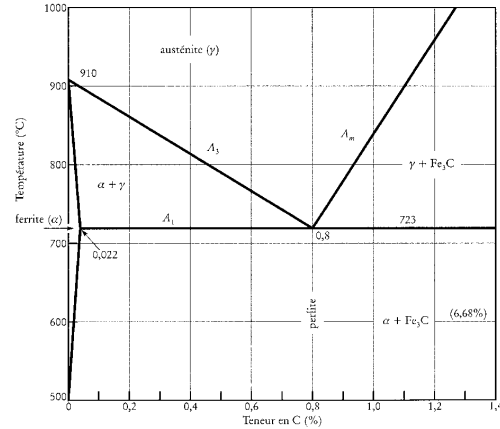


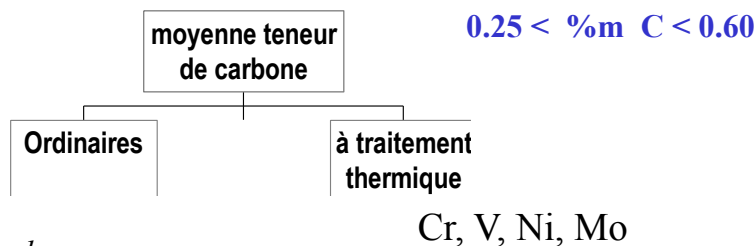
Figure 6.18 Partie du diagramme Fe-C représentant les transformations des aciers à l'état solide.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-45

Aciers à moyenne teneur de carbone



- ex. 1040,
- vilbrequins, boulons.

- Amélioration des propriétés :
 - austénisation,
 - + trempe,
 - + revenu.
- Trempabilité efficace pour section mince ou à haute vitesse de refroidissement.

$$Ceq = \%C + \frac{1}{6}Mn + \frac{1}{5}(Cr + Mo + V) + \frac{1}{15}(Ni + Cu)$$

10-46

Rappels sur les traitements thermiques

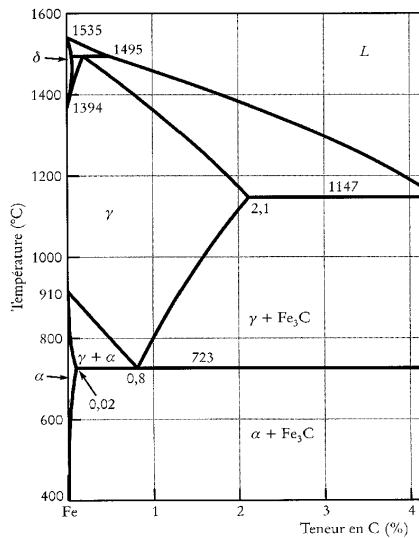
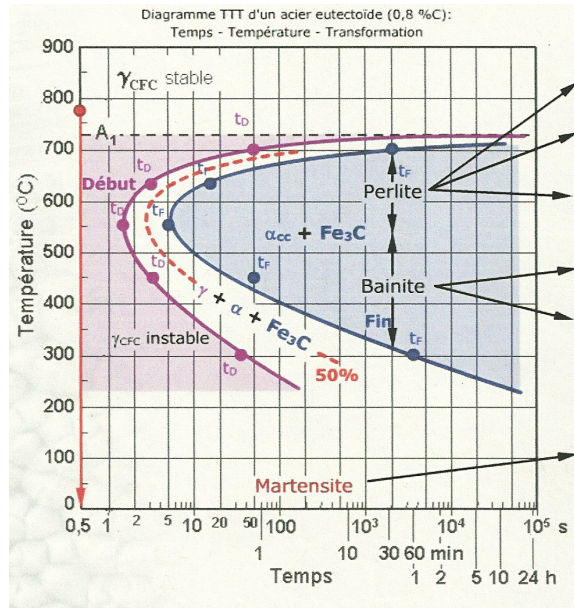


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre en



Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-47

Rappels sur les traitements thermiques

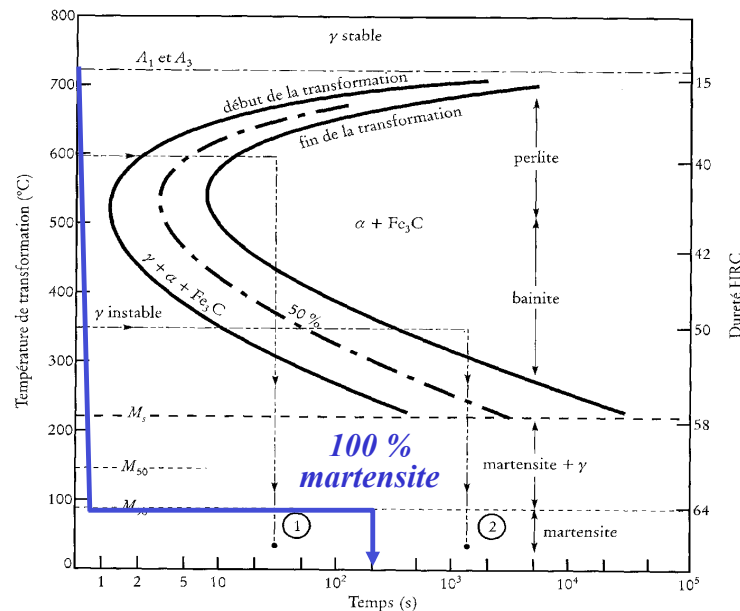


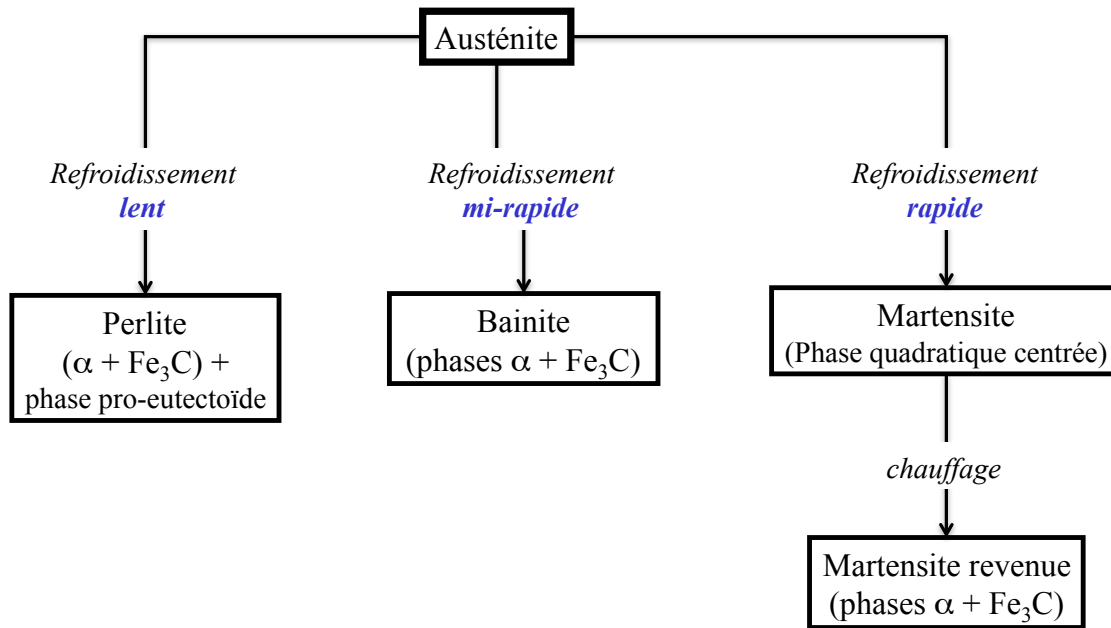
Figure 6.20 Courbes de transformation isotherme d'un acier eutectoïde (0,8 % C ; austénitisation : 30 min à 850 °C).

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-48

Résumé de la transformations de phase des aciers de composition eutectoïde



Effets des éléments α -gènes et γ -gènes sur les domaines α et γ

Effet de Mn ou Ni (γ -gène)

Effet des α -gènes

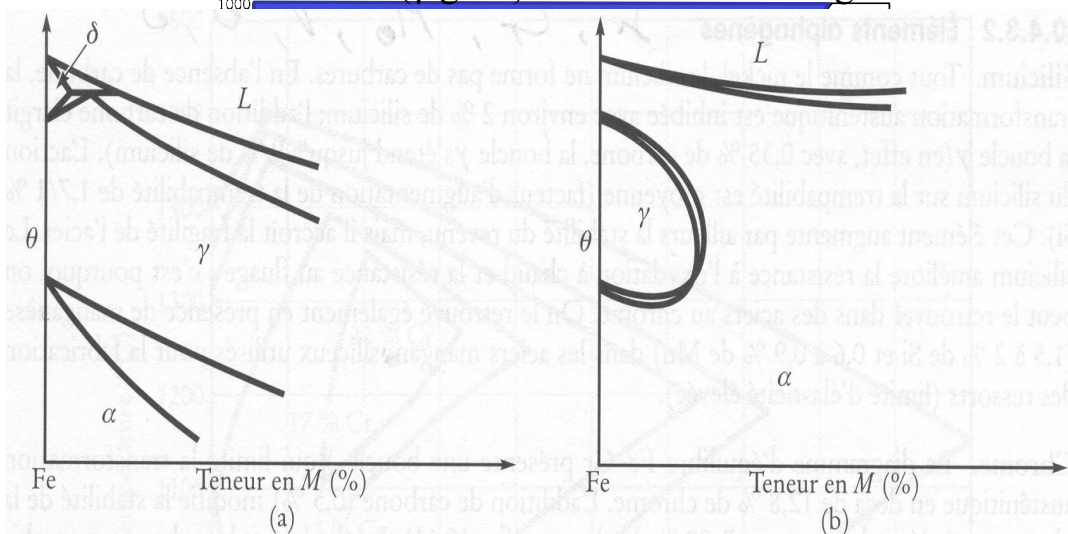


Figure 10.10 Influence des éléments d'alliage sur l'étendue des domaines α et γ du fer :

a) diagramme Fe-M à domaine γ ouvert ($M = \text{Ni ou Mn}$) ; b) diagramme Fe-M

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot
à domaine γ fermé ($M = \text{Cr, Mo, Ti, V, W, Nb, Al ou Si}$).

Autres effets de Cr et Mo (α -gènes)

- Le chrome : Cr
 - Rétrécit γ
 - Forme CrC, soluble dans γ à $T > 900^\circ\text{C}$
 - Augmente la trempabilité. *CrC favorise le durcissement par précipitation, ce qui pallie à l'adoucissement de la martensite lors du revenu*
 - Augmente la résistance à la corrosion et à l'usure
- Le molybdène : Mo
 - Rétrécit γ
 - Forme plus facilement des carbures que le Cr
 - Mo + Cr augmentent la trempabilité
 - Améliore la résistance après revenu *en favorisant l'apparition d'un durcissement secondaire suite à la présence de Mo₂C.*

Actions des éléments d'addition

- Éléments alphagènes (α -gènes) : Cr, Mo, Ti, W, V, Nb, Si, B, S
 - Rétrécit le domaine de stabilité de γ (austénite)
 - Augmente la température des transformations des phases
- Éléments γ -gènes : Mn, Ni. (*Voir Fig 10.10 p. 487*)
 - Élargissent le domaine de stabilité de γ (austénite)
 - Abaisse la température des transformations
 - Permet de garder une structure austénitique à température ambiante
- Éléments qui forment des carbures : Cr, W, Mo, V, Ti, Nb
 - Se substituent en partie à Fe dans Fe₃C
 - Amélioration de la résistance à l'usure
- Éléments formant une solution solide dans α (Si, Ni)
 - Ni freine la croissance du grain austénitique et améliore moyennement la trempabilité

Ex d' effet du Cr: Alphagène

Pour 0 % de C
Disparition du
domaine γ
Si % Cr > 12.8 %

Disparition complète
de γ pour %Cr > 20 %

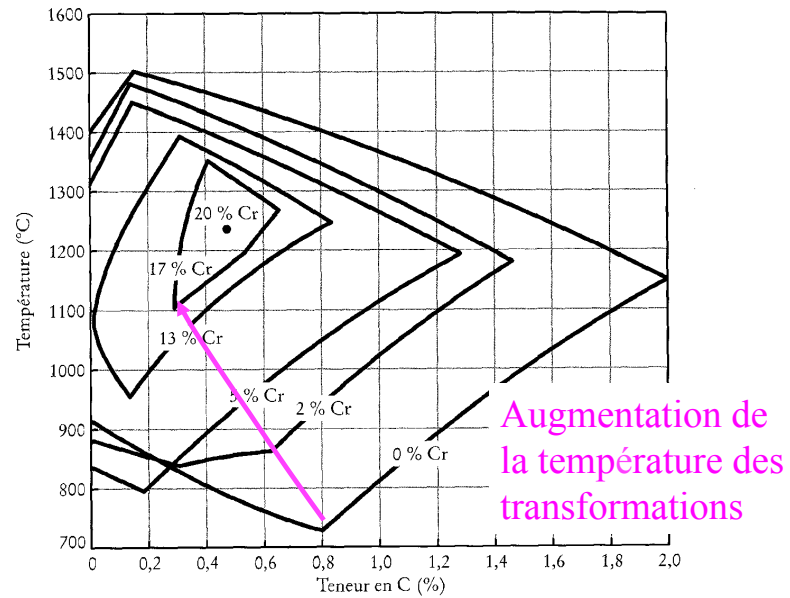


Figure 10.11 Système Fe-C-Cr : influence de la teneur en chrome sur l'étendue du domaine austénitique. Pour 0 % de carbone, la transformation austénitique disparaît quand la teneur en chrome atteint 12,8 % ; elle demeure impossible, quelle que soit la teneur en carbone, quand la teneur en chrome dépasse 20 %.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

Effet des éléments d'alliage

Les éléments d'alliage auront aussi un
effet sur les diagramme TTT TCT.

Effet des éléments d'alliage

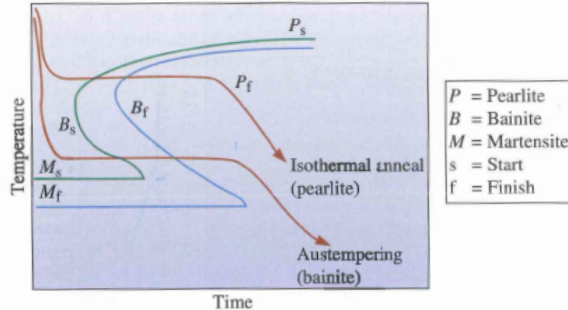
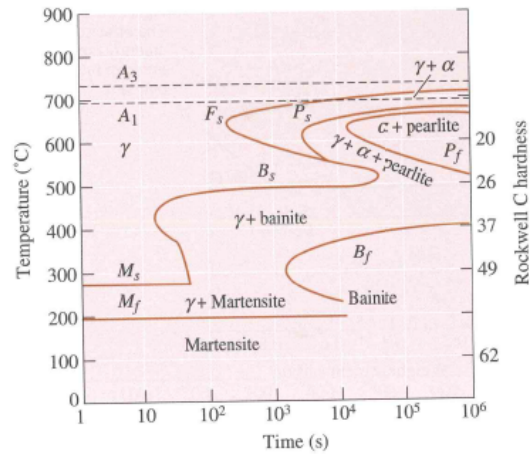


Figure 13-6 The austempering and isothermal anneal heat treatments in a



Source: *Essentials of Materials Science and Engineering*, D.R. Askeland, P.P. Fulay

10-55

MEC-200 – Technologie des matériaux

Carbone équivalent et soudabilité

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

- Plus C_{eq} est élevé, moins l'acier est soudable.

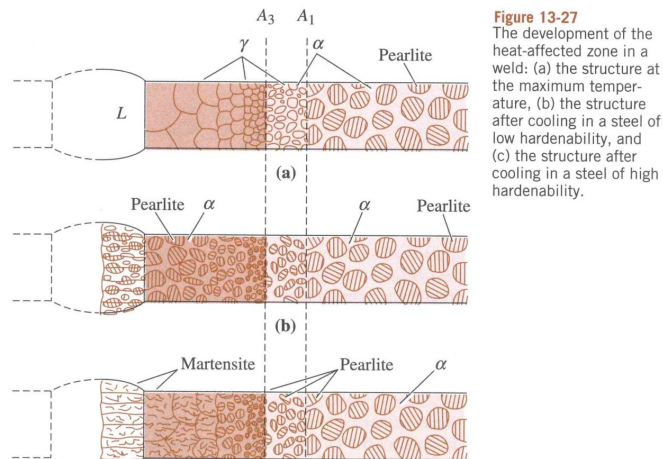


Figure 13-27
The development of the heat-affected zone in a weld: (a) the structure at the maximum temperature, (b) the structure after cooling in a steel of low hardenability, and (c) the structure after cooling in a steel of high hardenability.

Source: *Essentials of Materials Science and Engineering*, D.R. Askeland, P.P. Fulay

10-56

MEC-200 – Technologie des matériaux

Exercice

Regardons ce qui se passe pour deux aciers respectivement 1080 et 4340 qui sont soudés, si la soudure est refroidie à 5°C/s.

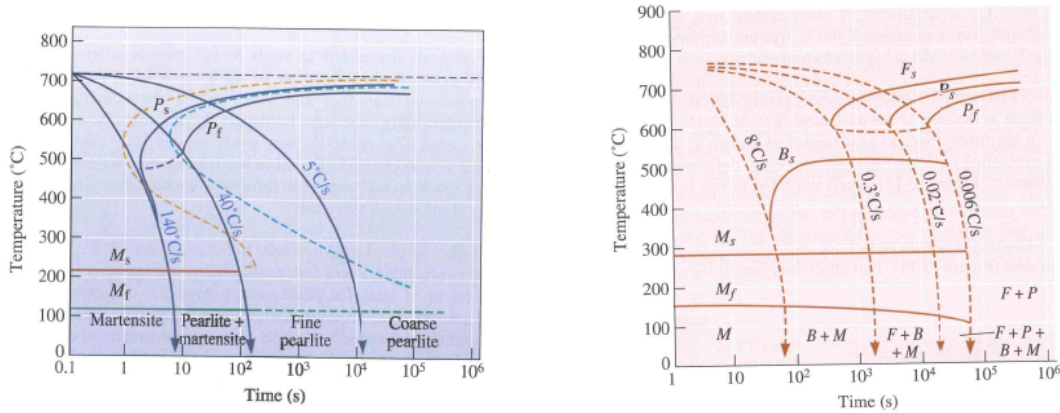


Figure 13-14 The CCT diagram (solid lines) for a 1080 steel compared with the TTT diagram (dashed lines).

Source: *Essentials of Materials Science and Engineering*, D.R. Askeland, P.P. Fulay

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-57

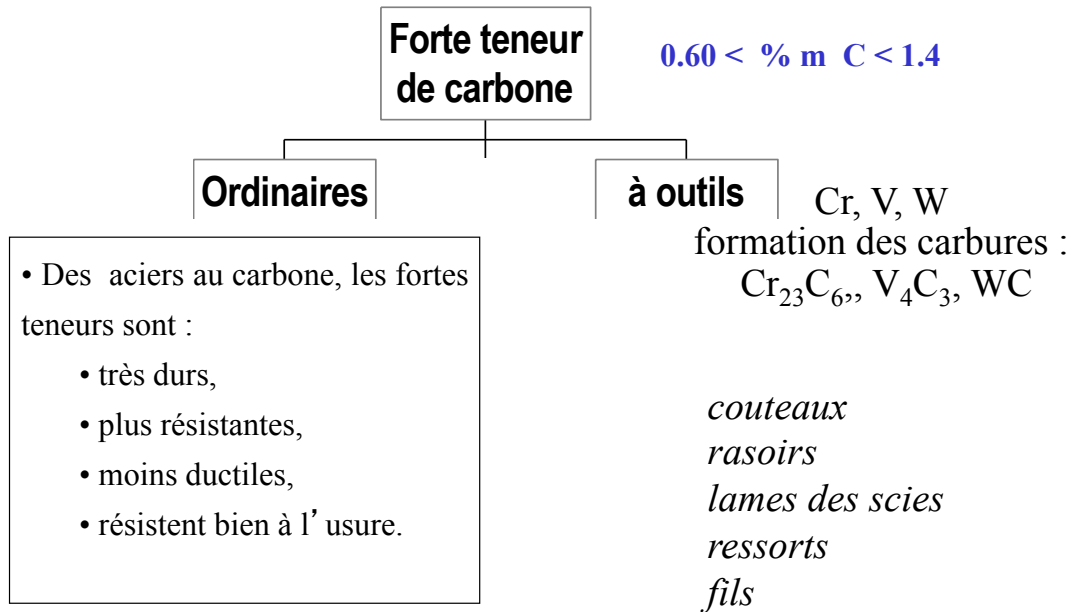
Influence des principaux éléments d'alliages dans l'acier

| W | V | Mo | Ni | Mn | Cr | C | Propriétés améliorées |
|---|---|----|----|----|----|---|---------------------------|
| | X | X | X | X | X | X | Résistance Rm |
| | | | | | X | X | Dureté |
| X | | | | X | X | X | Résistance à l'usure |
| X | X | X | X | X | X | X | Trempabilité |
| | | | X | | | | Ductilité |
| | X | | | X | | | Limite élastique Re |
| | | X | | X | | | Résistance à la corrosion |
| X | X | X | | X | | | Ténacité |
| X | | X | | X | | | Résistance au choc |
| X | | | | | | | Tenue en fatigue |
| | | | X | | | | Forgeage et laminage |
| | | | | X | X | | Diminue la ductilité |

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-58

Aciers à forte teneur de carbone



Caractéristiques d'utilisation des aciers à outils

- Dureté
- Trempabilité
- Tenue à chaud
 - Résistance mécanique
 - Résistance au fluage
 - Résistance à l'oxydation
- Ténacité
- Résistance à l'usure
- Résistance aux chocs thermiques

Tableau 10.2 Principaux types d'aciers à outils (nomenclature SAE/AISI)

| Types d'aciers | Composition (%) | | | | | | | | Exemples d'utilisations |
|---|-----------------|-----|------|------|------|------|------|---------|--|
| | C | Mn | Cr | V | W | Mo | Co | Divers | |
| W Aciers trempant à l'eau W1 | 0,6 à 1,40 | – | – | – | – | – | – | – | Outils pour le travail du bois et la frappe à froid Outils à main |
| W2 | 0,6 à 1,40 | – | – | 0,25 | – | – | – | – | |
| S Aciers résistant aux chocs S1 | 0,50 | – | 1,5 | 2,5 | – | – | – | – | Lames de cisailles, outils pneumatiques, poinçons |
| S5 | 0,55 | 0,8 | – | – | – | 0,4 | – | 2,0 Si | |
| Aciers pour travail à froid (O, A, D) | | | | | | | | | |
| O Aciers trempant à l'huile O1 | 0,90 | 1,0 | 0,5 | – | 0,5 | – | – | – | Outils de coupe, poinçons, matrice pour le travail à froid |
| O2 | 0,90 | 1,6 | – | – | – | – | – | – | |
| A Aciers trempant à l'air A2 | 1,0 | – | 5,0 | – | – | 1,0 | – | – | Filières d'étréage, petits cylindres de laminoirs, laminoirs à vis |
| A4 | 1,0 | 2,0 | 1,0 | – | – | 1,0 | – | – | |
| D Aciers au carbone et au chrome D2 | 1,5 | – | 12,0 | – | 1,0 | 1,0 | – | – | Cylindres de laminoirs, matrices d'estampage, calibres |
| D3 | 2,25 | – | 12,0 | – | – | 1,0 | – | – | |
| H Aciers pour travail à chaud H10 | 0,40 | – | 3,25 | 0,4 | – | 2,5 | – | – | Filières d'extrusion (Al et Mg), coquilles de coulées, matrices de forgeage et d'estampage |
| H21 | 0,35 | – | 3,5 | – | 9,0 | – | – | – | |
| H42 | 0,60 | – | 4,0 | 2,0 | – | 8,0 | – | – | |
| T Aciers à coupe rapide au W T1 | 0,75 | – | 4,0 | 1,0 | 18,0 | – | – | – | Outillages de tours et de fraiseuses, forets, broches, alésoirs |
| T6 | 0,80 | – | 4,5 | 1,5 | 20,0 | – | 12,0 | – | |
| M Aciers à coupe rapide au Mo M1 | 0,80 | – | 4,1 | 1,0 | 1,5 | 8,0 | – | – | Outils de coupe rapide dont la résistance à l'usure est très élevée |
| M2 | 0,90 | – | 4,0 | 2,0 | 6,0 | 5,0 | – | – | |
| M30 | 0,80 | – | 2,0 | 1,25 | 2,0 | 8,0 | 5,0 | – | |
| P Aciers pour moules à plastiques P2 | 0,07 | – | 2,0 | – | – | 0,20 | – | 0,5 Ni | Moules d'injection pour matières plastiques |
| P3 | 0,08 | – | 2,6 | – | – | – | – | 1,25 Ni | |

Source: Des Matériaux, JP Bailon, MD Dorlot

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Aciers à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique

Il n'y a pas de monde parfait !!!

- *Résistance à la corrosion limitée*
 - Recouvrements (galvanisation, peinture, ...)
- *Ajout de certains éléments (ex. Cu)*
 - Amélioration considérable
 - Formation d'une couche protectrice d'oxyde
- *Cu (0.2-0.55 %)*
- *Parfois Ni et Cr (0.5 %) et P (< 0.15 %)*

Aciers inoxydables

$$\% \text{Cr} > 12 \% \text{ m}$$

- Résistent à la corrosion généralisée et à l'oxydation;
- Température d'utilisation $\approx 1000^\circ\text{C}$;
- Le chrome rends l'acier inoxydable en favorisant en milieu oxydant, la formation d'un film passif à sa surface;
- Le chrome est un élément alphagène.

Effet du Cr : Alphagène

- Si $C < 0.08\% \text{C}$, nous n'aurons pas d'austénite si plus de 12 % de Cr. **acier inoxydable ferritique.**
- Si C nous pouvons avoir de l'austénite, nous pourrions avoir une transformation martensitique 17 % de Cr max, 1.1 % de C et **acier inoxydable martensitique.**

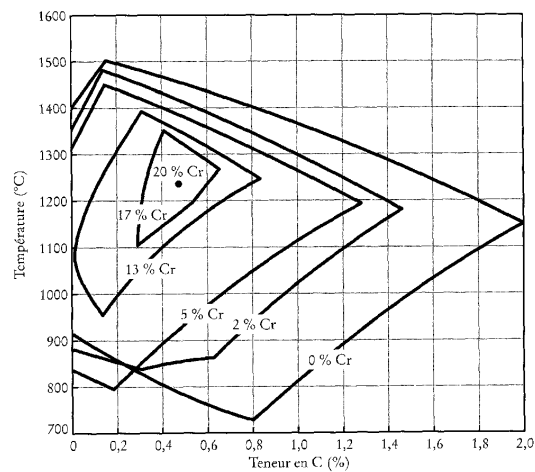


Figure 10.11 Système Fe-Cr : influence de la teneur en chrome sur l'étendue du domaine austénitique. Pour 0 % de carbone, la transformation austénitique disparaît quand la teneur en chrome atteint 12,8 % ; elle demeure impossible, quelle que soit la teneur en carbone, quand la teneur en chrome dépasse 20 %.

Effet du Cr : Alphagène

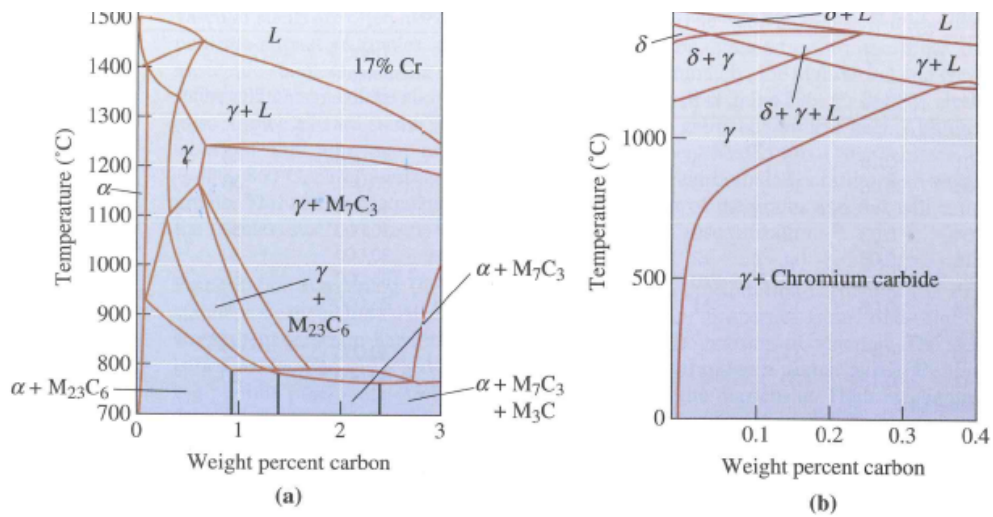


Figure 13-28 (a) The effect of 17% chromium on the iron-carbon phase diagram. At low-carbon contents, ferrite is stable at all temperatures. (b) A section of the iron-chromium-nickel-carbon phase diagram at a constant 18% Cr-8% Ni. At low-carbon contents, austenite is stable at room

Source: *Essentials of Materials Science and Engineering*, D.R. Askeland, P.P. Fulay
MEC-200 – Technologie des matériaux

10-65

Effet du Cr : Alphagène

- Si $C < 0.08\%C$, nous n'aurons pas d'austenite si plus de 12 % de Cr. **acier inoxydable ferritique**.
- Si C nous pouvons avoir de l'austenite, nous pourrions avoir une transformation martensitique 17 % de Cr max, 1.1 % de C et **acier inoxydable martensitique**.
- Si on met du nickel, élément gammagène, stabilisation de l'austénite et **acier inoxydable austénitique**.

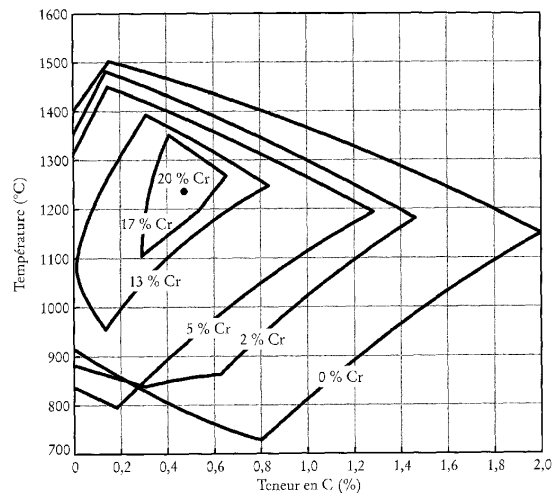


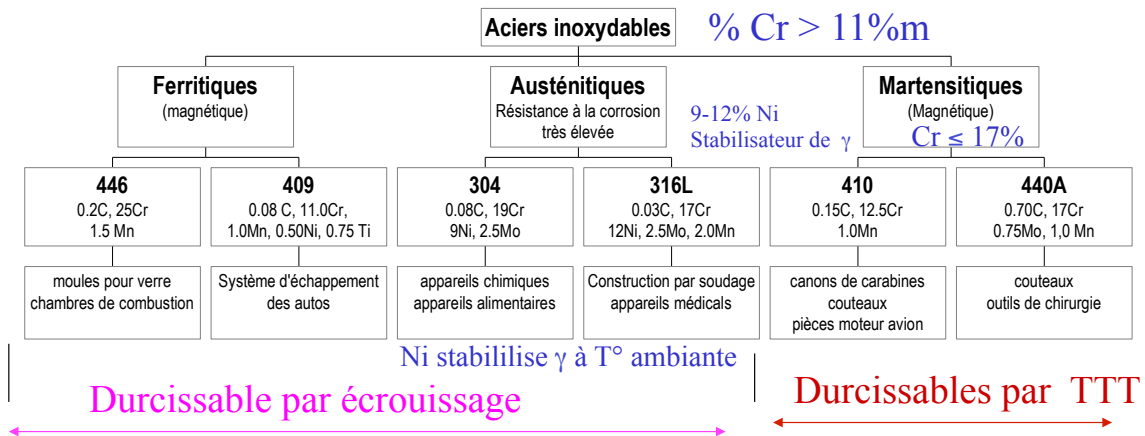
Figure 10.11 Système Fe-C-Cr : influence de la teneur en chrome sur l'étendue du domaine austénitique. Pour 0 % de carbone, la transformation austénitique disparaît quand la teneur en chrome atteint 12,8 % ; elle demeure impossible, quelle que soit la teneur en carbone, quand la teneur en chrome dépasse 20 %.

Source: *Des Matériaux*, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-66

Aciers inoxydables



Les Fontes

- % C > 2.14 (généralement 3 en pratique)
- Alliages Fe-C \pm

| |
|----|
| Si |
| Mn |
| S |
| P |

Diagramme Fe-C

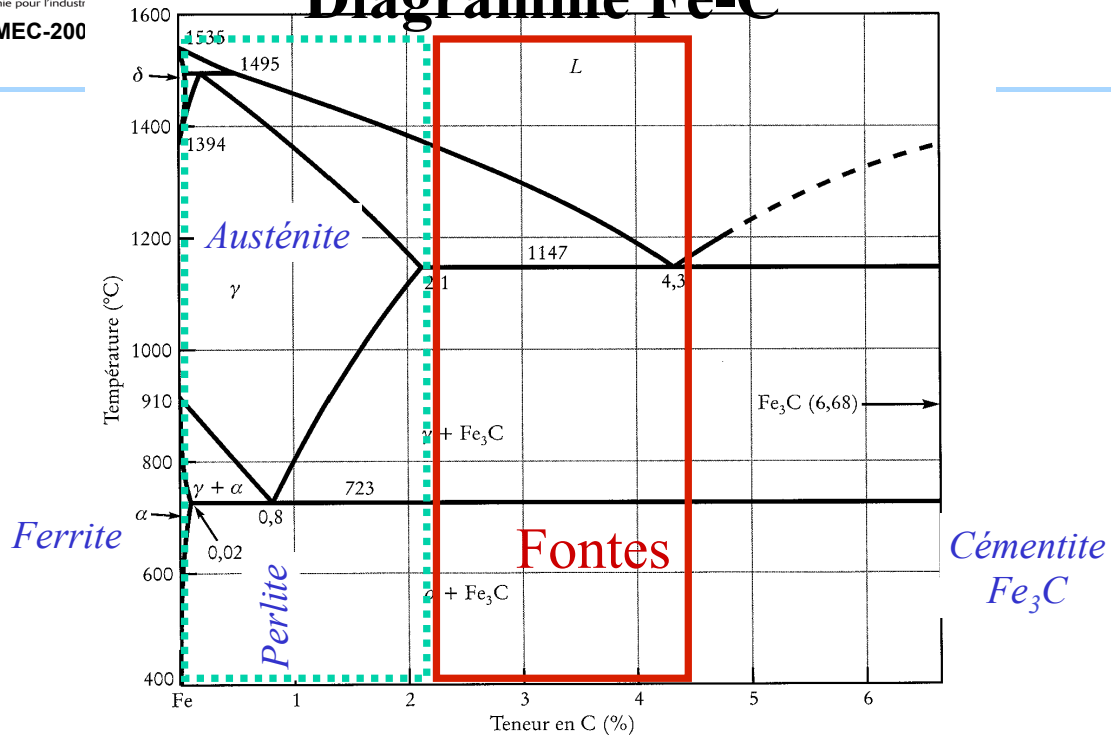


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C ; équilibre entre le fer et la cémentite Fe₃C.

69

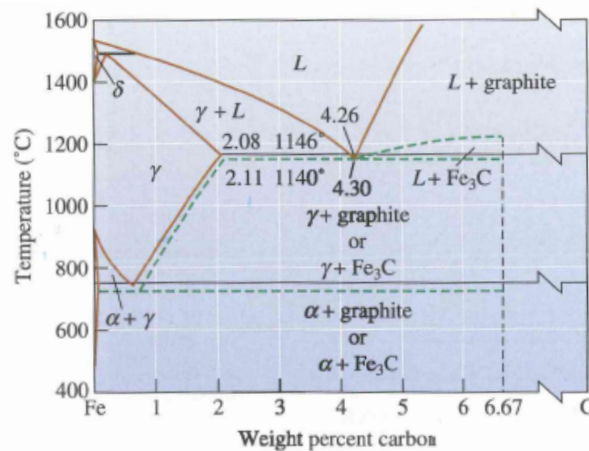
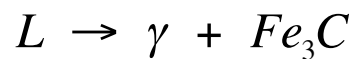


Figure 13-31 The iron-carbon phase diagram showing the relationship between the stable iron-graphite equilibria (solid lines) and the metastable iron-cementite reactions (dashed lines).

Conditions métastables : fonte blanche



En fait nous avons : fonte grise



Fonte grise

Graphite sous forme de flocons (gris) entouré d'une matrice de α ou de perlite.

- $2.5\% < \% C < 4\%$
- Propriétés mécaniques faibles
 - *Concentration des contraintes* (Extrémités des flocons)
 - *Fragile*
 - *Résistance élevée en compression*
 - *Bonne résistance à l'usure*
- Utilisations (moins de vibrations)
 - *socle des machines et des machine-outils*
 - *équipement lourds; Blocs moteurs, disques de freins*
- Bonne fluidité en fusion
 - *Moulage facile; pièces de forme complexe*
 - *Composants moins chers*

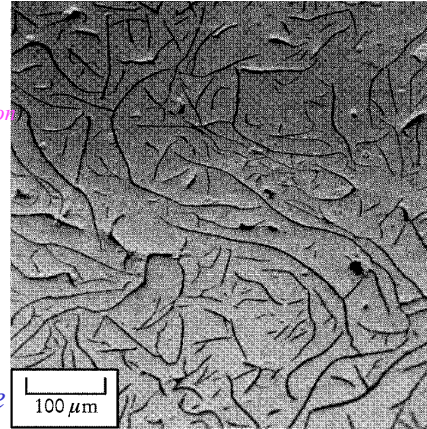


Figure 10.20 Microstructure d'une fonte grise.

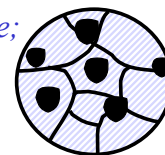
Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM **MEC-200 – Technologie des matériaux**

10-71

Fonte ductile (nodulaire) ou graphite sphéroïdale GS

- Fonte grise
 - + magnésium ou cérium lors de la coulée
- Graphite sous forme de nodule ou particules sphéroïdales
- Microstructure :
 - *Matrice perlitique ou ferritique renforcée de particules;*
 - *Traitement thermique (+ieurs heures à 700°C) ---> matrice ferritique.*
 - Propriétés (proches de celles des aciers) :
 - *Plus résistante ($R_m = 380$ à 480 Mpa) que la fonte grise;*
 - *Plus ductile ($A\% = 10$ à 20%) que la fonte grise.*
 - Utilisations :
 - *Robinets;*
 - *Corps des pompes;*
 - *Vilbrequins; engrenages.*

Perlite ou α + Gr



Fonte ductile
ou fonte sphéroïdale



MEC-200 – Technologie des matériaux Figure 10.22 Microstructure d'une fonte GS.

10-72

Fonte blanche

- % Si < 1 %m
 - refroidissement rapide
- Carbone sous forme de Fe_3C stabilisé
Surface de rupture blanche ---> fonte blanche

• Propriétés :

- *Très dure (400-600 HB) et fragile (effet de Fe_3C);*
- *très difficile à usiner ou à mettre en forme;*
- *très résistante à l'usure.*

• Utilisations (dureté et résistance à l'usure) :

- *rouleaux de laminoirs;*
- *sert à produire la fonte malléable.*

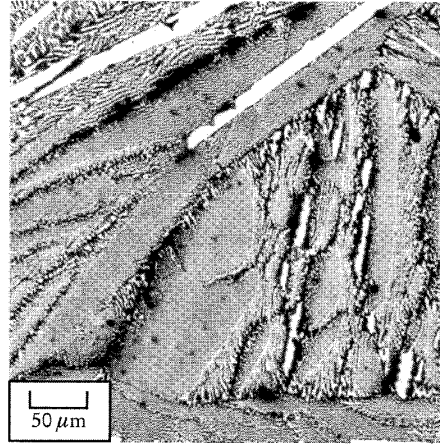


Figure 10.19 Microstructure d'une fonte blanche.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-73

Fonte malléable

- Fonte blanche
- *Chauffage prolongée entre 800-900°C*
- Atmosphère non oxydante

Décomposition de Fe_3C
formation de la perlite

Fonte malleable à cœur noir

- Microstructure : *similaire à celle de la fonte nodulaire*

• Propriétés :

- *Résistance élevée;*
- *Bonne ductilité et malléabilité.*

• Utilisations :

- *Petites pièces de quincaillerie;*
- *Bielles;*
- *Engrenage de transmission;*
- *Boîtiers des différentiels d'auto;*
- *Pièces de robinet pour chemins de fer;*
- *Raccords de tuyauterie pour plomberie.*

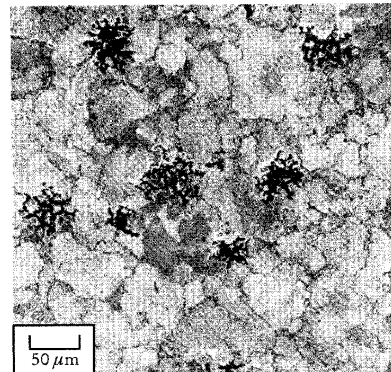


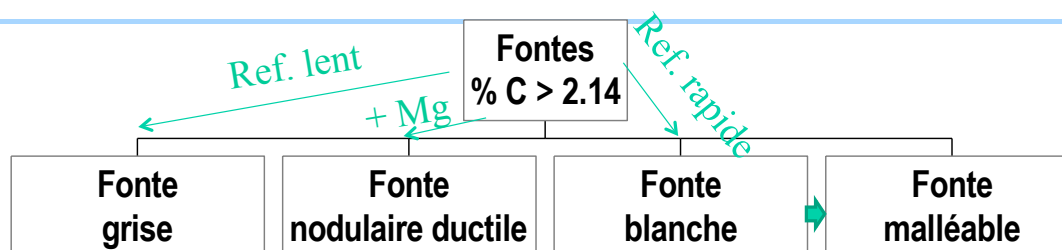
Figure 10.21 Microstructure d'une fonte malléable à cœur noir.
montrant des nodules de graphite de forme irrégulière

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-74

Classification des fontes


$$\text{Fe}_3\text{C} \text{ (cémentite métastable)} \rightarrow 3 \text{ Fe } (\alpha) + \text{C (graphite)}$$

Tendance à former du graphite dépend de :

Composition (% m Si > 1 %m)

Vitesse de refroidissement (faible)

- Fontes commerciales : $3\%m < \%C < 4.5\%m$
- Liquéfaction entre 1150 et 1300 °C
- Fondent et se moulent aisément

10-75

MEC-200 – Technologie des matériaux

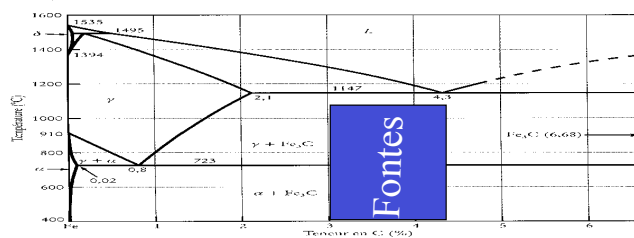
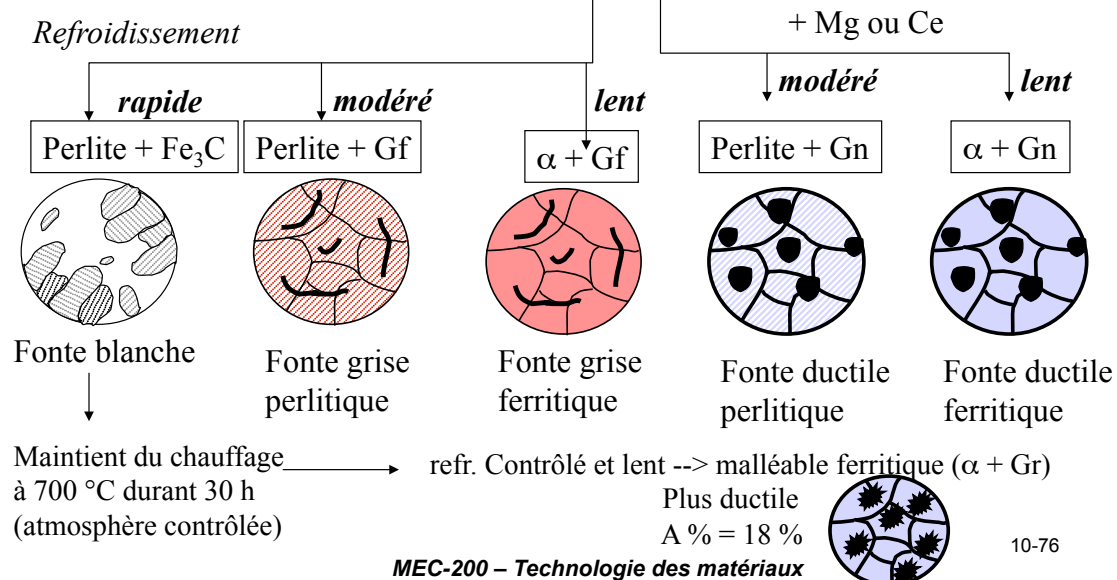


Figure 5.16 Diagramme d'équilibre Fe-C : équilibre entre le fer et la cémentite Fe₃C



10-76

MEC-200 – Technologie des matériaux

Tableau 10.5 Propriétés mécaniques des fontes

| | Type de fonte | Classe ASTM | État | Matrice* | Propriétés mécaniques | | | | |
|---------|---------------|-------------|------------------|----------|-----------------------|------------------------|---------------------------|-------|-----------|
| | | | | | $R_{e0,2}$ (MPa) | R_m (traction) (MPa) | R_m (compression) (MPa) | A (%) | Dureté HB |
| Fragile | Blanche | | Brut de fonderie | P | — | 250 à 500 | — | 0 | 400 à 600 |
| | Grise | 20 | Brut de fonderie | F et P | — | 150 | 570 | 0 | 155 |
| | | 30 | | F et P | — | 215 | 750 | 0 | 210 |
| | | 40 | | P | — | 290 | 965 | 0 | 235 |
| | | 60 | | P | — | 430 | 1290 | 0 | 300 |
| Ductile | Malléable | 35018 | Recuit | F | 240 | 365 | — | 18 | 150 |
| | | 45008 | Recuit | F et M | 310 | 450 | — | 8 | 180 |
| | | M7002 | Trempé et revenu | M | 480 | 620 | — | 2 | 250 |
| | GS | 60-40-18 | Recuit | F | 280 | 385 | — | 18 | 170 |
| | | 80-55-06 | Brut de fonderie | P et F | 420 | 560 | — | 6 | 200 |
| | | 120-90-02 | Trempé et revenu | M | 630 | 840 | — | 2 | 270 |

* Structure de la matrice : F, ferritique ; P, perlitique ; M, martensitique.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot **MEC-200 – Technologie des matériaux**

Composition des fontes

Tableau 10.4 Domaines de composition

| Type de fonte | C (%) | Si (%) |
|---------------|-----------|-----------|
| Blanche | 3,3 à 3,6 | 0,4 à 1,2 |
| Grise | 3,0 à 3,7 | 1,2 à 2,5 |
| Malléable | 2,0 à 2,6 | 1,0 à 1,6 |
| GS | 3,0 à 4,0 | 1,8 à 3,0 |

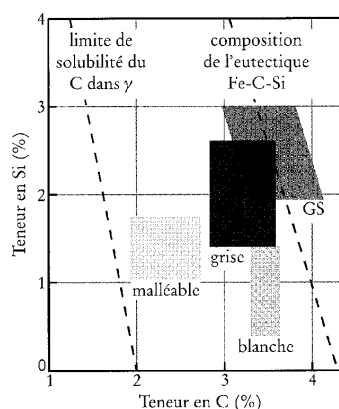


Figure 10.18 Domaines des teneurs en carbone et en silicium des fontes.

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

Que faut il retenir?

- La classification des aciers suivant leur teneur en carbone
- L' influence de la concentration de carbone sur les propriétés mécaniques
- L' influence du traitement thermique sur les propriétés mécaniques de l' acier qui contient différents % de C
- L' influence des éléments d' alliage sur la soudabilité, la trempabilité
 - Éléments α -gènes, γ -gènes
- Aciers HSLA, dual-phase
- Les différentes fontes

Source: Des Matériaux, JP Bailon, JM Dorlot

MEC-200 – Technologie des matériaux

10-79